

Вирішення оптимізаційної задачі керування роботою газоперекачувальних агрегатів в умовах невизначеності**М. І. Горбійчук, Б. В. Пашковський, О. В. Мойсєнко, Н. В. Сабат**

Розв'язано задачу оптимального керування групи паралельно працюючих газоперекачувальних агрегатів при мінімізації загальних витрат на експлуатацію нагнітачів за умови обмеження частоти обертання нагнітача, температури газу на виході із нагнітача та температури продуктів згорання на виході турбіни низького тиску. Враховано нечіткість продуктивності нагнітача спричинена великою похибкою вимірювання

Ключові слова: генетичні алгоритми, нечітка величина, процес компримування, вхідний конфузور, оптимальне керування

1. Вступ

Мережа магістральних газопроводів, які прокладені на території України, забезпечує безперебійне постачання газу як підприємствам країни, так і на експорт до країн Центральної і Східної Європи. За станом на теперішній час [1], загальна протяжність газопроводів досягла 34,8 тис. км. Проектна пропускна спроможність газотранспортної системи на вході в Україну складає 288 млрд. м³ на рік (800 млн м³ на добу).

Проектна потужність газотранспортної системи (ГТС) України у напрямі країн Західної Європи і Туреччини складає 142 млрд.куб.м на рік при фактичному обсязі транзиту в 2014 році – 60 млрд. куб. м. [2].

Таким чином, ГТС України має надлишкову потужність, що робить актуальною задачу вибору кількості паралельно працюючих агрегатів на кожній компресорній станції та частот їх обертання, виходячи із вибраного критерію ефективності роботи груп паралельних агрегатів.

2. Аналіз літературних джерел та постановка проблеми

У роботах [3–9] поставлені і розв'язані задачі оптимального перерозподілу потоків між паралельно працюючими агрегатами. При цьому автори використовують різні підходи до розв'язання таких задач. У роботі [3] поставлена задача мінімізувати витрати паливного газу для вибраної ділянки газопроводу, який має у своєму складі певне число компресорних станцій. Для заданих тисків на вход і виході кожного елементу газопроводу ставиться задача знаходження такх керуючих дій, щоб вартісний критерій набув мінімального значення. Для розв'язання поставленої задачі використана детермінована модель без врахування взаємодії системи із зовнішнім середовищем і не враховувано обмеження на керуючі дії.

У роботі [4] розглядається роль технічного стану ГПА при періодичному технічному обслуговуванні, що впливає на загальні витрати на компримування

газу, проте не враховано вплив зовнішнього середовища на технічний стан ГПА, та обрана детермінована модель.

Характеристики продуктивності та енергоефективності паралельно працюючих ГПА висвітлені в роботі [5], але модель, що наведена в роботі, не враховує значних похибок вимірювальних приладів продуктивності нагнітачів.

Проблемі вибору оптимального режиму роботи нагнітачів присвячена робота [6], яка вирішується шляхом перерозподілу газових потоків через ГПА, за умови, що ефективна загальна ефективність групи паралельно з'єднаних агрегатів має максимально можливу величину. У даній роботі не розглянуто жодних інших схем включення ГПА, крім паралельної.

Для підвищення ефективності роботи компресорної станції, автор роботи [7] вказує на необхідність стабілізації продуктивності паралельно працюючих нагнітачів за допомогою ПІ-регуляторів. Автор справедливо вказує, що задача стабілізації продуктивності нагнітачів є неоднозначною і для досягнення мінімальних затрат паливного газу необхідно певним чином розподілити навантаження на працюючі агрегати, проте представлена модель не враховує нечіткості технологічних параметрів.

У роботі [8] був розроблений комплексний алгоритм оптимального навантаження ГПА для оптимальної роботи КС. Проте рішення про мінімізацію витрат приймається шляхом послідовного комп'ютерного перебору режимів роботи на ЕОМ.

Дещо інший підхід до розв'язання задачі оптимального розподілу потоків між елементами газотранспортної системи запропоновано у роботі [9]. Для її розв'язання використовуються методи лінійного програмування і теорія мереж з врахування обмежень, які зумовлені матеріальними балансами потоків. Оскільки задача детермінована, тому поза увагою авторів залишилися такі питання, як вплив зовнішнього середовища на роботу ГТС, технічний стан окремих агрегатів системи, вплив похибок вимірювання на процес прийняття рішень та ін.

3. Мета і задачі дослідження

Метою роботи є розв'язання задачі оптимального керування роботою паралельно працюючих газоперекачувальних агрегатів за умови, що загальні витрати паливного газу будуть мінімальними, при виконанні обмежень на технологічні параметри і врахуванні значної похибка вимірювання перепаду тиску на конфузори. Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

- визначення функції належності продуктивності нагнітача;
- побудова математичних моделей та формалізація задачі оптимального керування процесом компримування природного газу;
- визначення частот обертання роторів відцентрових нагнітачів природного газу.

4. Формалізація задачі оптимального керування процесом компримування природного газу

Загальні витрати на експлуатацію нагнітачів компресорної станції з газотурбінним приводом можна обчислити за такою формулою:

$$J(\bar{n}) = c_g \sum_{i=1}^m G_i(n_i), \quad (1)$$

де $J(\bar{n})$ – вартість роботи m паралельно працюючих агрегатів, віднесеної до одиниці часу; c_g – вартість одиниці об'єму паливного газу, що витрачається на привід газотурбінної установки; $G(n_i)$ – витрата паливного газу, що віднесена до нормальних умов, яку споживає i -тий ГПА; n_i – частота ротора i -го нагнітача.

У відповідності з технологічним режимом необхідно обмежити температуру газу на виході із нагнітача T_{out} та температуру продуктів згорання на виході турбіни низького тиску – T_v . Для безпомпажної роботи повинна бути обмежена нижня частота ротора нагнітача [10]:

$$T_{out} \leq T_{out}^{(max)}, \quad (2)$$

$$T_v \leq T_v^{(max)}, \quad (3)$$

$$n_i^{(min)} \leq n_i \leq n_i^{(max)}, \quad (4)$$

де $T_{out}^{(max)}$, $T_v^{(max)}$ – максимально допустимі значення для величин T_{out} і T_v ; $n_i^{(min)}$, $n_i^{(max)}$ – нижнє і верхнє обмеження на частоту ротора нагнітача.

Температура вихлопних газів $T_v^{(i)}$ i -го ГПА, температура газу на виході із i -го нагнітача $T_{out}^{(i)}$ є функціями таких технологічних факторів як частота ротора n_i , температура T_{in} та тиск газу P_{in} на вході нагнітача, ступінь підвищення тиску ϵ та залежать від параметрів навколишнього середовища – атмосферного тиску P_c та температури T_c

$$T_v^{(i)} = f_v^{(i)}(n_i, P_{in}, T_{in}, \epsilon, P_c, T_c), \quad (5)$$

$$T_{out}^{(i)} = f_{out}^{(i)}(n_i, P_{in}, T_{in}, \epsilon, P_c, T_c). \quad (6)$$

При виконанні обмежень (2)–(4) повинна виконуватись вимога забезпечення заданої продуктивності Q компресорної станції

$$Q = \sum_{i=1}^m Q_i, \quad (7)$$

де Q_i – продуктивність i -го нагнітача.

Продуктивність i -го нагнітача є функцією таких параметрів як n_i , P_{in} , T_{in} , ϵ , P_c і T_c

$$Q_i = f_q^{(i)}(n_i, P_{in}, T_{in}, \varepsilon, P_c, T_c). \quad (8)$$

Залежності (5), (6) і (8) в роботі [11] подані як емпіричні моделі, які отримані за результатами спостережень за роботою ГПА. Апроксимація результатів спостережень здійснювалась поліномом степені r

$$y = \sum_{i=0}^{M-1} a_i \prod_{j=1}^k x_j^{s_{ji}}, \quad (9)$$

де M – кількість членів полінома; a_i – коефіцієнти полінома; s_{ji} – степені аргументів, які повинні задовольняти обмеженню; k – кількість незалежних змінних,

$$\sum_{j=1}^n s_{ji} \leq r. \quad (10)$$

Кількість членів M полінома (10) визначають за такою формулою [12]

$$M = \frac{(r+k)!}{r!k!}. \quad (11)$$

Оскільки залежності (5), (6) і (8) є функціями технологічних параметрів P_{in} , T_{in} , ε та параметрів навколишнього середовища P_c і T_c , які відомі, то підставивши їх в отримані рівняння регресії, що мають вигляд полінома (9), отримаємо залежності $T_{out}^{(i)} = \psi_1^{(i)}(n_i)$, $T_v^{(i)} = \psi_2^{(i)}(n_i)$ і $Q_i = Q_i(n_i)$. Ці залежності будуть лише функціями однієї змінної n_i . Обмеження (2) і (3) задають верхню межу значень температур – $T_{out}^{(max)}$ і $T_v^{(max)}$, що приводить до рівнянь

$$\psi_2^{(i)}(n_i) - T_{out}^{(max)} = 0 \text{ і } \psi_4^{(i)}(n_i) - T_v^{(max)} = 0.$$

У результаті отримаємо рівняння, додатними коренями яких будуть величини – $n_i^{(out)}$ і $n_i^{(v)}$. Тоді

$$\tilde{n}_{i,max} = \min(n_i^{(out)}, n_i^{(v)}, n_{i,max}).$$

Таким чином, будемо розв'язувати таку задачу оптимального керування роботою ГПА:

$$\min : J(\bar{n}) = c_g \sum_{i=1}^m G(n_i) \quad (12)$$

при обмеженнях

$$Q = \sum_{i=1}^m Q_i(n_i), \quad (13)$$

$$n_i^{(\min)} \leq n_i \leq \tilde{n}_i^{(\max)}, \quad i = \overline{1, m}. \quad (14)$$

З використанням цехової автоматики продуктивність нагнітача визначалась шляхом вимірювання перепаду тиску ΔP_i на входному конфузові з наступним розрахунком за такою формулою [13]:

$$Q_i = A_H^{(i)} \sqrt{\Delta P_i \rho_i}, \quad (15)$$

де $A_H^{(i)}$ – коефіцієнт об'ємної продуктивності конфузора i -го нагнітача; ρ_i – густина газу на вході нагнітача.

Розрахунок об'ємної продуктивності Q_i відцентрового нагнітача (ВЦН) за формулою (15) дає похибку в десятки відсотків [14].

Для отримання емпіричних моделей за результатами спостережень за роботою ГПА був використаний метод синтезу емпіричних моделей на засадах генетичних алгоритмів [15]. Суть методу у тому, що вибирають поліном степені r , в якому частині коефіцієнтів приписується значення нуль, а інша частина коефіцієнтів відмінна від нуля.

Утворимо упорядковану структуру довжиною M , в якій на i -тому місці буде стояти одиниця або нуль в залежності від того чи параметр a_i , $i = \overline{0, M-1}$ моделі (9) відмінний від нуля, чи нульовий.

Задачу синтезу емпіричної моделі сформуємо наступним чином: із початкової популяції хромосом шляхом еволюційного відбору вибрати таку, хромосому, яка забезпечує найкраще значення функції пристосування (мінімальне значення критерію селекції).

Для відбору моделі із числа всіх можливих множну експериментальних значень розбивають на дві частини – навчальну і перевірну. Навчальна частина загальної множини служить для розрахунку параметрів моделі, а перевірна – для відбору найкращої моделі із заданої множини моделей. Такий відбір здійснюється за допомогою критеріїв регулярності або зміщення [11, 15].

Використаємо метод синтезу емпіричних моделей на засадах генетичних алгоритмів. Отримаємо модель залежності (8) у вигляді полінома (9). Підставивши числові значення величин n_i , P_{in} , T_{in} , ϵ , P_c і T_c , які вимірюються засобами цехової автоматики, отримаємо поліном у такому вигляді:

$$Q_i = \sum_k a_k^{(i)} n_i^k. \quad (16)$$

З огляду на те, що вимірювання продуктивності i -го нагнітача відбувається зі значною похибкою, то є всі підстав вважати коефіцієнти моделі (16) нечіткими числами. Приймаємо, що функція належності $\mu(a_k^{(i)})$ нечіткої величини $a_k^{(i)}$ має трикутну форму (рис. 1).

На рис. 1 прийняті такі позначення

$$z = a_k^{(i)}, \quad \mu(z) = \mu(a_k^{(i)}), \quad z_0 = a_{k,0}^{(i)},$$

де $a_{k,0}^{(i)}$ – модальне значення нечіткої величини $a_k^{(i)}$.

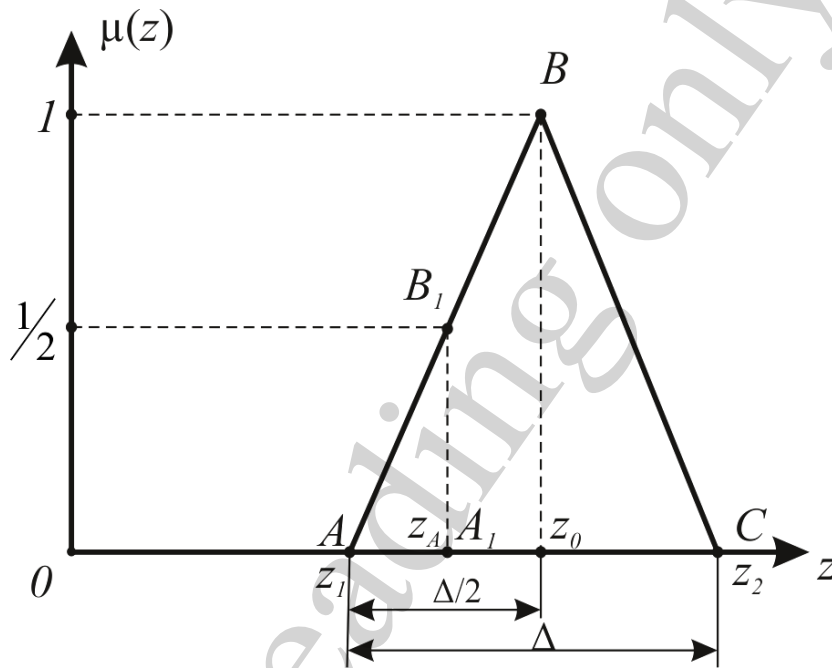


Рис. 1. Трикутна функція належності нечіткої величини

Знайдемо аналітичний вираз для функції належності $\mu(z)$. Відрізок прямої AB проходить через точки з координатами $A(z_1; 0)$ і $B(z_0; 1)$. Із рис. 1 видно, що $z_1 = z_0 - \Delta/2$.

Отже, рівняння прямої, яка проходить через точки $A(z_0 - \Delta/2; 0)$ і $B(z_0; 1)$, буде таким

$$\mu(z) = q_1 + q_2 z, \quad z \in [z_0 - \Delta/2; z_0].$$

Враховуючи координати точок A і B , через які проходить пряма, знаходимо, що

$$q_1 = -2 \frac{z_0}{\Delta} + 1, \quad q_2 = \frac{2}{\Delta}.$$

Аналогічно можемо знайти рівняння прямої, що проходить через точки $B(z_0; 1)$ і $C(z_0 + \Delta/2; 0)$

$$\mu(z) = q_1 + q_2 z, \quad z \in [z_0; z_0 + \Delta/2],$$

де

$$q_1 = 2 \frac{z_0}{\Delta} + 1, \quad q_2 = -\frac{2}{\Delta}.$$

Таким чином, функція належності нечіткої величини z опишеться таким аналітичним виразом:

$$\mu(z) = \begin{cases} -\frac{2}{\Delta}(z_0 - z) + 1, & z \in [z_0 - \Delta/2; z_0], \\ \frac{2}{\Delta}(z_0 - z) + 1, & z \in [z_0; z_0 + \Delta/2]. \end{cases} \quad (17)$$

Трикутна функція належності незручна для практичного використання. Це пояснюється її кусково-лінійною формою, де у точках A , B і C (рис. 1) відсутні похідні.

Апроксимуємо кусково-лінійну функцію належності (17) експоненціальною функцією

$$\mu(z) = \exp\left(-\frac{(z - z_0)^2}{2\sigma^2}\right). \quad (18)$$

Параметр σ^2 , який є параметром концентрації нечіткості, виберемо таким, щоб функція належності (18) проходила через точку B_1 з координатами $B_1(z_A; 1/2)$ (рис. 1). Знайдемо абсцису z_A . Для цього розглянемо трикутники ABD і AB_1A_1 . Із умови подібності цих трикутників маємо

$$\frac{BD}{AD} = \frac{A_1B_1}{AA_1}.$$

Оскільки

$$AD = \Delta/2, \quad BD = 1, \quad A_1B_1 = 1/2,$$

то

$$AA_1 = \frac{AD \cdot A_1B_1}{BD} \text{ або } AA_1 = \frac{\Delta}{4}.$$

Враховуючи те, що

$$z_A = z_1 + AA_1 \text{ і } z_1 = z_0 - \Delta/2,$$

отримуємо

$$z_A = z_0 - \frac{\Delta}{4}.$$

Отже, маємо

$$\mu(z_A) = \exp\left(-\frac{(z_A - z_0)^2}{2\sigma^2}\right).$$

Звідси

$$\sigma^2 = -\frac{(z_A - z_0)^2}{2 \ln \mu(z_A)}.$$

З врахуванням значень z_A і $\mu(z_A)$ знаходимо, що

$$\sigma^2 = -\frac{\Delta^2}{32 \cdot \ln 2}.$$

На рис. 2 показана трикутна функція належності (17) і апроксимація залежністю (18) при $\Delta = 0,4$ і $z_0 = 1,2$.

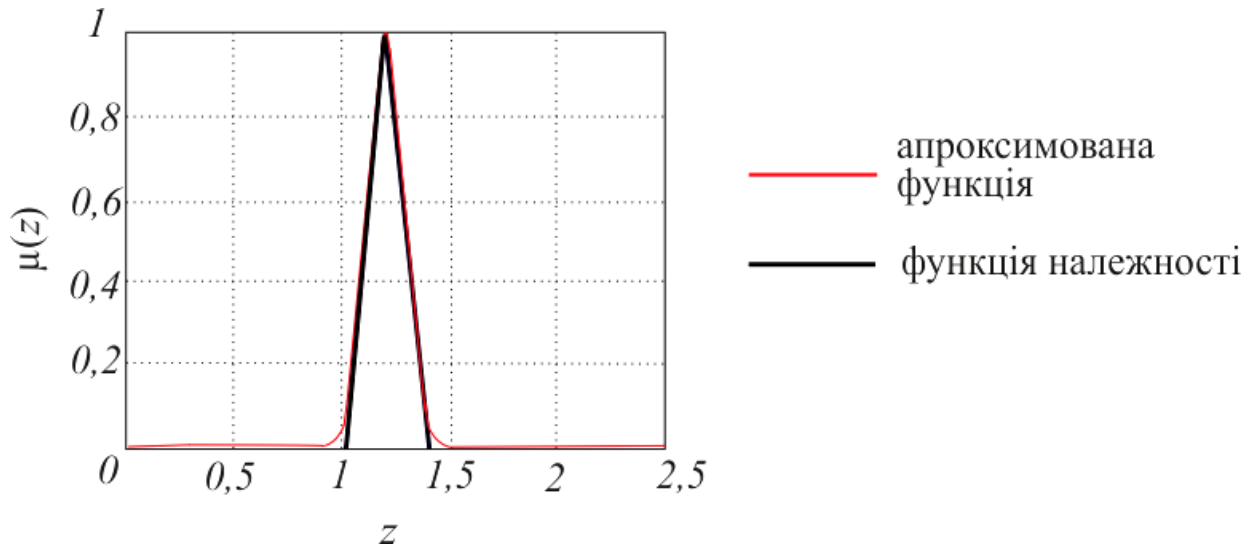


Рис. 2. Трикутна функція належності нечіткої величини z та її апроксимація

Для кожного коефіцієнта емпіричної моделі (17) буде своє значення величини Δ і відповідно

$$\sigma_i^2 = \frac{\Delta_i^2}{32 \cdot \ln 2}. \quad (19)$$

Виходячи із того, що коефіцієнти емпіричної моделі (16) є нечіткими величинами з функцією належності (18), де коефіцієнт концентрації визначається формулою (19), знайдемо $\mu(Q_i)$. При цьому будемо мати на увазі, що при виконанні операцій додавання і при множенні гаусового числа на чітку величину знову отримуємо гаусове число [8], а це означає, що

$$\mu(Q_i) = \exp \left(- \frac{(Q_i - m_q^{(i)})^2}{2(\sigma_q^{(i)})^2} \right). \quad (20)$$

Параметри $m_q^{(i)}$ і $\sigma_q^{(i)}$ функції належності (20) знайдемо, використовуючи правила арифметичних операцій над нечіткими числами (L-R) – типу в гаусовому базисі [16, 17].

Виходячи із структури моделі (16), для визначення параметрів $m_q^{(i)}$ і $\sigma_q^{(i)}$ необхідні такі операції над нечіткими величинами як додавання і множення нечіткого числа на чітке.

Нехай $A_{LR} = \langle a_1, \alpha_1, \beta_1 \rangle$ і $B_{LR} = \langle a_2, \alpha_2, \beta_2 \rangle$ – нечіткі числа $(L-R)$ – типу, де a_1 , a_2 – модальні значення; α_1 , α_2 , β_1 , β_2 – ліві і праві коефіцієнти нечіткості. Тоді параметри нечіткого числа

$$C_{LR} = A_{LR} + B_{LR} = \langle a, \alpha, \beta \rangle$$

обчислюється за такою формулою:

$$a = a_1 + a_2, \quad \alpha = \alpha_1 + \alpha_2, \quad \beta = \beta_1 + \beta_2; \quad (21)$$

Знайдемо суму із n нечітких чисел

$$s = \sum_{i=1}^n v_i,$$

для кожного із яких функція належності визначається формулою (18). Очевидно, що

$$v_i^{(LR)} = \langle a_{v,i}, \alpha_{v,i}, \alpha_{v,i} \rangle.$$

Маємо

$$s_{1..2} = v_1 + v_2.$$

У відповідності з формулою (21)

$$s_{1..2}^{(LR)} = \langle a_{1..2}, \alpha_{1..2}, \alpha_{1..2} \rangle,$$

де $a_{1..2} = a_{v1} + a_{v2}$, $\alpha_{1..2} = \alpha_{v1} + \alpha_{v2}$.

Так як

$$s_{1..3} = v_1 + v_2 + v_3 = s_{1..2} + v_3,$$

то

$$s_{1..3}^{(LR)} = \langle a_{1..3}, \alpha_{1..3}, \alpha_{1..3} \rangle,$$

де $a_{1..3} = a_{1..2} + a_{v3}$, $\alpha_{1..3} = \alpha_{1..2} + \alpha_{v3}$.

З врахуванням значень $a_{1..2}$ і $\alpha_{1..2}$ маємо

$$a_{1..3} = a_{v1} + a_{v2} + a_{v3}, \quad \alpha_{1..3} = \alpha_{v1} + \alpha_{v2} + \alpha_{v3}.$$

Продовжуючи такий ітераційний процес, в загальному випадку будемо мати:

$$s_{LR} = \langle a_s, \alpha_s, \alpha_s \rangle,$$

де

$$a_s = \sum_{i=1}^n a_{vi}, \quad \alpha_s = \sum_{i=1}^n \alpha_{vi}. \quad (22)$$

У випадку, коли нечітке число множиться на чітке, то функція належності залишається гаусовою [16].

Нехай нечітке число z , помножене на чітке число n_i^k . Тоді $v = zn_i^k$ або $z = \frac{v}{n_i^k}$. Підставляючи значення z у формулу (18), отримуємо функцію належності нечіткої величини v . Маємо

$$\mu(v) = \exp\left(-\frac{(v - n_i^k z_0)^2}{2n_i^{2k} \sigma^2}\right).$$

Отже, $a_{vi} = n_i^k z_0$, $\alpha_{vi} = n_i^{2k} \sigma^2$.

Тепер врахуємо, що у відповідності з функцією належності (18) $z_0 = a_{k,0}^{(i)}$. З врахуванням формули (22) маємо

$$m_q^{(i)} = \sum_k a_{k,0}^{(i)} n_i^k, \quad (23)$$

$$\left(\sigma_q^{(i)}\right)^2 = \sum_k n_i^{2k} \sigma_i^2. \quad (24)$$

Для функції (20) задамось γ – зрізом. У результаті отримуємо рівняння

$$\exp\left(-\frac{(Q_i - m_q^{(i)})^2}{2(\sigma_q^{(i)})^2}\right) = \gamma,$$

яке розв'яжемо відносно змінної Q_i . У результаті отримуємо

$$Q_i = m_q^{(i)} + \sigma_q^{(i)} \sqrt{\ln \frac{1}{\gamma^2}},$$

де $0 < \gamma \leq 1$.

Значення Δ_i будемо обчислювати за такою формулою:

$$\Delta_i = \delta a_{k,0}^{(i)},$$

де $0 \leq \delta \leq \Delta_m$, Δ_m – величина, яка визначається точністю вимірювання продуктивності нагнітача за перепадом тиску на конфузорі.

Підставляючи значення σ_i^2 , яке обчислюється за формулою (19), у рівність (24) і враховуючи значення Δ_i , отримаємо

$$Q_i = m_q^{(i)} + \frac{\delta}{4(\ln 4)^{1/2}} \left(\sum_k \left(n_i^k a_{k,0}^{(i)} \right)^2 \right)^{1/2} \sqrt{\ln \frac{1}{\gamma^2}}.$$

Введемо таке позначення:

$$K_\gamma = \frac{\delta}{4(\ln 4)^{1/2}} \cdot \sqrt{\ln \frac{1}{\gamma^2}}$$

і врахуємо значення $m_q^{(i)}$, яке обчислюється за формулою (24). Тоді

$$\tilde{Q}_i(n_i) = \sum_k a_{k,0}^{(i)} n_i^k + K_\gamma \left(\sum_k \left(a_{k,0}^{(i)} n_i^k \right)^2 \right)^{1/2}. \quad (25)$$

Отже, отримали таку задачу оптимального керування групою паралельно працюючих компресорних агрегатів:

$$\min : J(\bar{n}) = c_g \sum_{i=1}^m G_i(n_i) \quad (26)$$

при обмеженнях

$$Q = \sum_{i=1}^m \tilde{Q}_i(n_i), \quad (27)$$

$$n_i^{(\min)} \leq n_i \leq \tilde{n}_i^{(\max)}, \quad i = \overline{1, m}, \quad (28)$$

де $\tilde{Q}_i(n_i)$ обчислюється за формулою (25).

На рис. 3 показана блок-схема автоматизованої системи керування процесом компримування природного газу для i -го нагнітача.

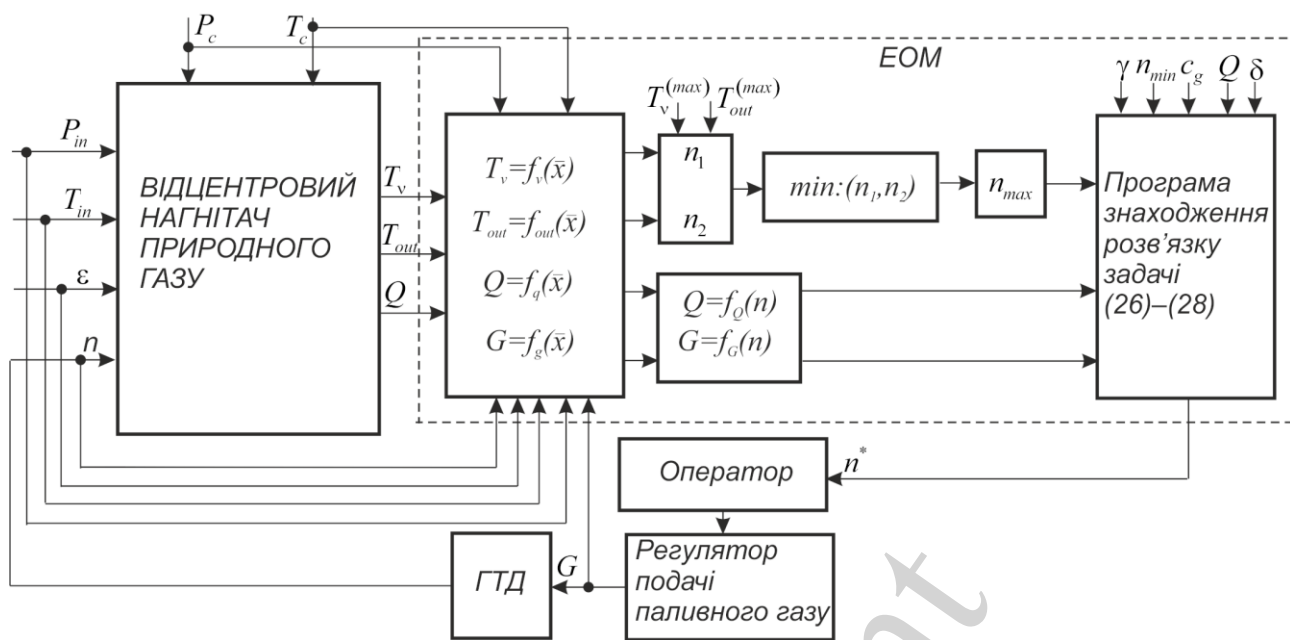


Рис. 3. Блок-схема автоматизованої системи керування процесом компримування природного газу

У критерій оптимальності (26) входить залежність $G(n_i)$, яку на основі спостережень синтезують у вигляді полінома (9) на засадах генетичних алгоритмів. При відомих значеннях P_{in} , T_{in} , ε , P_c і T_c , які вимірюються засобами цехової автоматики, залежність $G_i(\bar{x})$, де

$$\bar{x} = (n_i, P_{in}, T_{in}, \varepsilon, P_c, T_c)^T,$$

буде функцією однієї змінної n_i – керуючої дії.

5. Розв'язання задачі оптимального керування газоперекачувальними агрегатами

Розв'язано задачу оптимізації за наступних умов:

- кількість агрегатів, що працюють у групі: 2;
- нижнє обмеження на частоту обертання ротору нагнітача $n_1^{(\min)} = 2800$ об/хв, $n_2^{(\min)} = 3000$ об/хв.;
- верхнє обмеження на частоту обертання ротору нагнітача $n_1^{(\max)} = 4800$ об/хв, $n_2^{(\max)} = 5000$ об/хв.;
- температура газу на виході нагнітача $T_1^{out} = 52$ °C, $T_2^{out} = 54$ °C;
- температура вихлопних газів $T_1^v = 450$ °C, $T_2^v = 460$ °C;
- заданий обсяг перекачки газу $210\,000$ н/м³.

Для розв'язання оптимізаційної задачі було створено програмне забезпечення на базі пакету MatLab. Використовувалася вбудована функція нелінійної

оптимізації «fmincon», як цільова функція взята (26) при лінійних обмеженнях (28), нелінійних – (27). Фрагмент коду програми наведено нище

```
% Зчитування даних із файлу спостережень
[n,P_in,P_out,T_in,T_out,T_v,P_a,T_a,Q,G] = fun_ReadData();

% Обчислення ступені підвищення тиску e
e = fun_CalculateEpsilon(P_a,P_in,P_out);
r = 3; % степінь многочлена

% Обчислення коефіцієнтів емпіричної моделі температури на виході
нагнітача
params = [P_in,T_in,e,P_a,T_a,T_out];
[corel,kT_out] = fun_GeneticPolyfit(n, params, r);

% Обчислення коефіцієнтів емпіричної моделі температури вихлопних
газів
params = [P_in,T_in,e,P_a,T_a,T_v];
[corel,kT_v] = fun_GeneticPolyfit(n, params, r);

% Обчислення коефіцієнтів емпіричної моделі
% перепаду тиску на конфузори
params = [P_in,T_in,e,P_a,T_a,Q];
[corel,kQ] = fun_GeneticPolyfit(n, params, r);

% Обчислення коефіцієнтів емпіричної моделі
% витрати паливного газу
params = [P_in,T_in,e,P_a,T_a,G];
[corel,kG] = fun_GeneticPolyfit(n, params, r);

% Вхідні дані задачі
% Нижнє обмеження на частоту ротора нагнітача, об/хв
n_min = 3000;
% Верхнє обмеження на частоту ротора нагнітача, об/хв
n_max = 5000;
% Верхнє обмеження на температуру газу на виході нагнітача
T_out_max = 36;
% Верхнє обмеження на температуру вихлопних газів
T_v_max = 460;

kT_v(1) = kT_v(1) - T_v_max;
kT_out(1) = kT_out(1) - T_out_max;

% Обмеження на частоту обертання ротора при обмеженні T_out
nT_out = min(roots(kT_out));
```

```

% Обмеження на частоту обертання ротора при обмеженні T_v
nT_v = min(roots(kT_v));
% Загальне обмеження на частоту обертання ротора
n_max = min([n_max nT_out nT_v]);
% Вартість одиниці об'єму паливного газу
c_g = 275;
% Заданий обсяг перекачки газу
Q0 = 104000;

% Величина гамма-зрізу
gamma = 0.8;
% Дельта – точність вимірювання за перепадом тиску на конфузори
delta = 0.15;
K = (delta / (4 * log(4) ^ 1 / 2)) * log(1 / gamma ^ 2) ^ (1/2);

options = optimset('Algorithm','interior-point','Display','off');
[res_n,G] = fmincon(@(n)fun_G(n, kG), 1000, [], [], [], [], n_min, n_max,
    @(n)fun_Qcond(n,kQ,K,Q0), options);

```

У результаті розв'язку задачі оптимізації отримані наступні результати:
 $n_1=3200$ об/хв; $n_2=3550$ об/хв.

6. Обговорення результатів дослідження оптимізації процесу компримування природного газу

Існуючі методи вирішення оптимізаційних задач керування процесом компримування природного газу використовують детерміновані моделі. Проте неточність вимірювання технологічних параметрів дає підстави розглядати продуктивність нагнітача як нечітку величину із трикутною формою належності, що дозволяє побудувати адекватну математичну модель процесу компримування природного газу.

Трикутна форма функції належності є незручною для використання її при розв'язанні задачі оптимального керування процесом компримування природного газу. Тому у роботі запропоновано апроксимувати її гаусовою функцією належності. Це дало змогу сформулювати задачу оптимізації у термінах нечітких величин і на цій основі розробити ефективні методи її розв'язання з врахування обмежень на керуючі дії.

Введення нечіткості в оптимізаційну задачу змінило структуру обмеження, яке визначає баланс потоків газу через паралельно включені нагнітачі. У результаті появляється адитивна складова, яка є своєрідною «платою» за нечіткість у вимірюванні продуктивності нагнітачів. Наявність такої складової трансформує детерміновану задачу дискретного лінійного програмування в нелінійну задачу дискретного програмування, що суттєво ускладнює процес розв'язання такої задачі оптимізації. Природно, що введення нечіткості в оптимізаційну задачу дещо погіршує ефективність процесу керування і таке погіршення може коливатися в межах 3–5 % у порівнянні з задачею у детермінованій

постановці, яка не враховує особливості вимірювання продуктивності нагнітачів при існуючих методах і технічних засобах. Оскільки технологічні параметри газоперекачувального агрегату змінюються з плином часу, то виникає необхідність перерахунку параметрів моделі для вирішення оптимізаційної задачі процесу компримування природного газу. Визначення періодичності перерахунку параметрів моделі є наразі невирішеною науковою задачею і є перспективою подальшого дослідження.

7. Висновки

Продуктивності відцентрових нагнітачів розглядаються, як нечіткі величини із трикутними функціями належності, які апроксимовані експоненціальними функціями та обчислені їх параметри, що дало змогу формалізувати задачу оптимального керування процесом компримування природного газу з врахуванням нечіткості продуктивності нагнітачів та обмежень на керуючі дії. Розроблено алгоритмічне і програмне забезпечення у середовищі MATLAB та розв'язано задачу оптимального керування, що дало змогу визначити частоти обертання роторів відцентрових нагнітачів природного газу, при яких сумарні затрати паливного газу на компримування природного газу є мінімальними.

Література

1. Hovdiak, P. M., Kalapun, I. M., Chabanovych, L. B. et. al. (2002). Stan i shliakhy pidvyshchennia efektyvnosti ta nadiynosti transportuvannia pryrodnoho hazu hazotransportnoi systemoiu Ukrainy. Vol. 2. Materialy mizhnarodnoi konferentsyi «Nafta i haz Ukrainy-2002». Kyiv: UNHA, 95–96.
2. Transportuvannia pryrodnoho hazu. Available at: <http://www.naftogaz.com/www/3/nakweb.nsf?Open>
3. Priluckiy, M. H., Buhvalova, I. R., Afraymovich, L. G., Starostin, N. V., Filimonov, A. V. (2008). Optimizacionnye zadachi operativnogo upravleniya rabotoy kompressornoy stanciei. Ehlektronnyy zhurnal «Issledovano v Rossii».
4. Han, G., Zhang, H., Ling, K. (2016). The optimization approach of casing gas assisted rod pumping system. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 32, 205–210. doi: 10.1016/j.jngse.2016.03.078
5. Mokhatab, S., Poe, W. A., Mak, J. Y. (2015). Natural Gas Compression. Handbook of Natural Gas Transmission and Processing, 349–381. doi 10.1016/b978-0-12-801499-8.00011-0
6. Bekker, M. V., Hulichev, V. V., Meleshko, V. I., Strilets, A. O., Artemenko, D. V. (2005). Vyznachennia optymalnoho rezhymu roboty kompresornoho tsekhu pry paralelnomu vkliuchenni HPA. Naftova i hazova promyslovist, 2, 45–48.
7. Slobodchikov, K. Yu. Reshenie optimizacionnoy zadachi v sisteme upravleniya rezhimom kompressorного cekha gazoperekachivayushchih agregatov. Available at: http://model.exponenta.ru/slob_02.html
8. Vertepov, A. G., Zarickiy, S. P., Leshchenko, I. Ch., Lineckiy, I. K. (2009). Algoritmicheskoe obespechenie optimal'noy zagruzki GPA. Gazovaya promyshlennost', 4, 57–60.
9. Samsonov, R. O. (2007). Upravlenie geohkologicheskimi riskami: op-

timizaciya raboty KS na magistral'nyh gazoprovodah. Ehlektronnyi nauchnyy zhurnal «Neftegazovoe delo». Available at: http://www.ogbus.ru/authors/SamsonovRO/SamsonovRO_2.pdf

10. Horbiychuk, M. I., Zaiachuk, Ya. I. (2008). Optymalne keruvannia robotiu nahnitachiv pryrodnoho hazu iz vrakhuvanniam tekhnichnoho stanu HPA. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 6 (5 (30)), 7–11.

11. Horbiychuk, M. I., Kohutiak, M. I., Vasylenko, O. B., Shchupak, I. V. (2009). Metod syntezy empiychnykh modelei na zasadakh henetychnykh alhorytmiv. Rozvidka ta rozrobka naftovykh i hazovykh rodovysch, 4 (33), 72–79.

12. Horbiychuk, M. I., Kohutiak, M. I., Zaiachuk, Ya. I. (2008). Induktyvnyi metod pobudovy matematychnykh modelei hazoperekachuvalnykh ahrehativ pryrodnoho hazu. Naftova i hazova promyslovist, 5, 32–35.

13. Kompresorni stantsyi. Kontrol teplotekhnichnykh ta ekolohichnykh kharakterystyk hazoperekachuvalnykh ahrehativ: SOU 60.03-30019801-011:2004 (2004). Kyiv: DK «Ukrtranshaz», 117.

14. Ilchenko, B. S. (2011). Diahnostuvannia funktsionalno-tekhnichnoho stanu hazo-perekachuvalnykh arehativ. Kharkiv: KhNAMH, 228.

15. Ivahnenko, A. G., Koppa, Yu. V., Stepashko, V. S. et. al.; Ivahnenko, A. G. (Ed.) (1980). Spravochnik po tipovym programmam modelirovaniya. Kyiv: Tekhnika, 180.

16. Raskin, L. G., Seraya, O. V. (2008). Nechetkaya matematika. Osnovy teorii. Prilozheniya. Kharkiv: Parus, 352.

17. Dyubua, D., Prad, A. (1990). Teoriya vozmozhnostey. Prilozhenie k predstavleniyu znaniy v informatike. Moscow: Radio i svyaz', 286.